

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2013.05.020

# 食品罐体模具感应加热过程的有限元仿真及分析

章 祺, 侯升平

(浙江南化防腐设备有限公司, 浙江 杭州 311255)

**摘要:** 食品罐体上盖刻痕深度的大小直接影响盖体撕开的难易程度和包装过程中耐高压的要求, 改变下模具的高度即可改变食品罐体上盖的刻痕深度。为解决食品罐体上盖刻痕深度的实时控制和食品罐体下模具的温度场分布、模具表层与靠近芯部的温度差异问题, 利用ANSYS软件中的磁-热耦合场分析功能, 完成了食品罐体上盖生产中下模具感应加热过程的有限元仿真分析, 得到了下模具的温度场分布情况, 对食品罐体下模具进行了感应加热实验, 并绘得了下模具的温度变化曲线。实验及研究结果表明: 感应加热过程中, 下模具的表层温度高, 靠近芯部的温度低, 但两者间的温差并不大, 下模具在感应加热过程中温度上升快且基本呈线性变化, 采用感应加热有利于保证下模具快速受热的同时其温度均匀变化, 即下模具的高度变化均匀且容易控制调节, 这为实时控制食品罐体上盖刻痕深度方案的提出奠定了理论基础。

**关键词:** 有限元; 感应加热; 食品罐体; 实时控制

中图分类号: TS292; TH39

文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2013)05-0600-03

## Finite element modeling analysis and simulation on induction heating process of food tank die

ZHANG Qi, HOU Sheng-ping

(Zhejiang Nanhua Anticorrosion Equipment Co., Ltd., Hangzhou 311255, China)

**Abstract:** The nick depth of the food tank cover would directly influence its open and the anti-high-pressure requirement during packing. Change the length of the food tank die's underneath would change the nick depth of the roof cover. Aiming at real time control to the nick depth of food tank die's roof cover and the temperature distribution of the food tank die's underneath as well as temperature difference between die's surface and its core, through the magnetic-thermal coupling analysis function of ANSYS, the finite element modeling (FEM) of induction heating on the food tank die's underneath during the manufacture of the die's roof cover was completed and the die's underneath temperature distribution was determined. The results indicate that the die's cylinder surface temperature is high and the core's is lower with a small difference with that of the surface and the temperature of the die's underneath is increasing rapidly and linearly during induction heating. It also indicates that benefits of using induction heating would guarantee rapid and even heating. It means that the height of die's underneath varies evenly and is easy to be controlled, which supplies a theoretical foundation for the project of real-time control of the nick depth of food tank's roof cover.

**Key words:** finite element method; induction heating; food tank; real-time control

## 0 引 言

食品罐体在食品领域的应用十分广泛, 如各类罐头、啤酒饮料、八宝粥等。食品罐体上盖是在涂覆有保护膜的基本盖上起泡、铆上拉环和预先压成刻线的有

机结合。开启时, 拉环以铆钉为支点产生作用力, 拉环的鹰嘴磕破刻线, 再拉提拉环盖体沿刻线撕开。食品罐体上盖刻痕深度的大小直接影响盖体撕开的难易程度。当食品罐体上盖刻痕深度过大则罐体无法满足包装过程中耐高压的要求, 当食品罐体上盖刻痕深度过

收稿日期: 2012-08-03

作者简介: 章 祺(1965-), 男, 浙江萧山人, 工程师, 主要从事工业自动化方面的研究. E-mail: zhangqi650418@163.com

小则难以达到“易开”的目的,尤其是对老人、妇女、小孩等力气小的人群而言。由于加工时原材料厚度会有细微变化、冲压刀头由于连续冲压而钝化,这些因素导致食品罐体上盖刻痕深度发生变化,从而导致次品的出现。为保证食品罐体上盖质量,目前生产企业通常采用停机检测与手动调整(更换不同高度的下磨具或更换冲压刀头)的方式来调节食品罐体刻痕深度。这种方式效率低,工作量大,产品合格率不高,严重制约了企业生产效率的提高。因此,十分有必要研究并开发食品罐体上盖刻痕深度的自动控制技术,以提高相关企业的生产效率和自动化水平。

由于食品罐体上盖的刻痕是由上模具冲压下模具上方的板材时留下的三角痕迹,在冲压机构精度足够高的情况下,通过改变冲压刀头的刀刃和下磨具表面之间的距离就能改变刻痕深度,换句话说,改变下模具的高度即可改变食品罐体上盖的刻痕深度。金属具有热胀冷缩的特性,因此当食品罐体的下模具被加热时,它就会发生膨胀,其在高度方向发生的变化量由温度和线膨胀系数决定。由于不同温度下固体的线膨胀系数变化很微小,实际应用中通常可将线膨胀系数视为与温度无关的常数,认为下磨具高度变化量与温度变化量成正比<sup>[1]</sup>。因此,研究者可通过调节下模具温度的方式来调整下模具的高度,从而实现食品罐体上盖刻痕深度的控制。

感应加热是一项较先进的加热技术,它具有加热速度快、效率高等特点,已经被广泛应用于有色金属、机械制造业、汽车等行业<sup>[2]</sup>。本研究提出将其应用到食品罐体上盖的生产中,用于加热下模具并通过控制温度来调整下模具的高度。感应加热模具是否能让模具高度平稳变化,是否能让食品罐体上盖刻痕深度达到质量要求,换句话说,感应加热模具是否能显著提高食品罐体产品合格率及生产效率?本研究将通过ANSYS中的磁-热耦合场分析功能来模拟食品罐体模具加热过程来验证这一方案的可行性,并通过实验验证。

## 1 食品罐体模具感应加热过程的有限元仿真及分析

ANSYS提供了两种耦合场分析方法:直接耦合法与间接耦合法。直接耦合法的耦合单元包含与相应的耦合场相关的所有必须自由度,仅通过一次求解就能得出耦合场的分析结果,而间接耦合法可以独立进行两种场的独立分析,而且其耦合过程是一个循环过程,迭代在两个场间进行直到结果收敛到所需精度<sup>[3]</sup>。考虑模具材料物理参数在受热过程中随温度变化对电磁场、温度场的影响<sup>[4]</sup>,以及食品罐体刻痕深度的控制精度要求较高,本研究采用间接耦合法。

### 1.1 定义单元类型和单元实常数

在ANSYS有限元分析中,恰当选取单元类型及单元实常数对有限元分析有着重要的影响。

为达到较高的计算精度,研究者须保证在加热透入深度内至少能够划分3~5层的单元,故本研究定义模具、空气、线圈为PLANE13单元,其选项设置: $K_1$ 为AZ, $K_3$ 为Axisymmetric。由于物体在受热过程中会对外热辐射,还需添加辐射单元SURF151,并定义实常数斯蒂芬-波尔兹曼常数 $\sigma$ 值为 $5.67e-8$ <sup>[5]</sup>。

模具几何模型尺寸如图1所示。

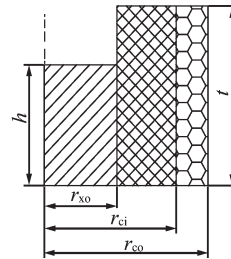


图1 模具几何模型尺寸

食品罐体模具感应加热有限元模型的一组实常数定义如表1所示。

表1 模具加热模型的一组实常数

参数	数值
模具模型外径/m	$r_{xo}=0.025\ 15$
线圈模型内径/m	$r_{ci}=0.045\ 65$
线圈模型外径/m	$r_{co}=0.056\ 65$
模具模型高度/m	$h=0.039$
线圈模型高度/m	$t=0.058$
频率/Hz	$f=29\ 000$
$\pi$	$pi=4 \cdot atan(1)$
最大电导率/( $S \cdot m^{-1}$ )	$cond=0.5e7$
真空磁导率/( $H \cdot m^{-1}$ )	$muzero=4e-7 \cdot pi$
相对磁导率/( $H \cdot m^{-1}$ )	$mur=16$
趋肤深度/m	$skind=sqrt(1/pi \cdot freq \cdot cond \cdot muzero \cdot mur)$
结束时间/s	$ftime=10$
谐波分析时间增/s	$tinc=0.1$
起始时间/s	$time=0$
最大时间步长/s	$delt=0.1$

表2 模具的材料特性

	温度/ $^{\circ}C$	导热系数/( $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ )	比热容/( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ )	电阻率/( $\Omega \cdot cm$ )	密度/( $g \cdot cm^{-3}$ )
模 具	20	47.68	472	$0.20e-6$	7.824
	100	43.53	480	$0.25e-6$	
	200	40.44	498	$0.33e-6$	
	300	38.13	524	$0.52e-6$	
	400	36.02	560	$0.79e-6$	

### 1.2 设置材料属性

绝大多数单元类型需要定义材料属性,本研究分析中定义模具的属性如表2所示。

另外,隔热层和线圈的相对磁导率均为1 H/m。

### 1.3 创建模型并划分网格

创建模型时,对于简单结构的可按照实际形状创建,对于结构复杂的模型,应尽量简化研究对象结构,以减小计算工作量。

食品罐体下模具的结构如图2所示。模具几何结构是空心圆柱体,柱体上有一轴向通孔,通孔与模具外壁间的间距大于感应加热的趋肤深度,即通孔对模具受热是没有影响的,因此,研究者可将食品罐体下模具看成轴对称结构,即创建模型时,只对模型剖面的二分之一进行建模<sup>[6]</sup>。

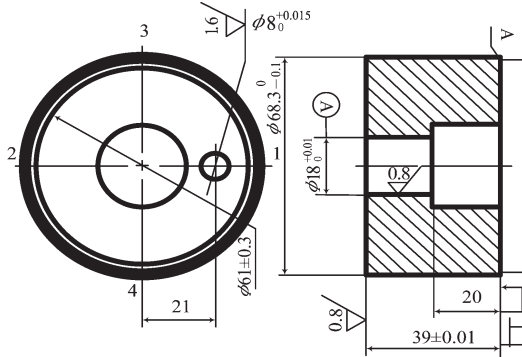


图2 食品罐体下模具结构图

在 ANSYS 中,网格划分效果就是指确定单元的大小、单元数量以及单元在模型中的分布密度情况,而单元类型和模型的结构也决定了如何划分网格。本研究的模具模型简单,网格的划分也较简单。食品罐体下模具的有限元模型如图3所示。为了降低计算量, $A_1$ 为模具区域,靠近模具表面网格划分较密,往中心密度逐渐递减, $A_2$ 为空气区域,采用自由网格划分, $A_3$ 为线圈与隔热层区域,采用的是均匀划分。

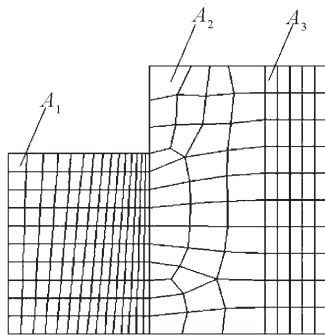


图3 食品罐体下模具有限元模型

### 1.4 加载求解

感应加热的载荷是施加在线圈内部的电流密度。它与线圈的匝数、电流频率、截面积有关<sup>[7]</sup>,本研究中线圈的截面积为  $19.625 \text{ mm}^2$ 、线圈匝数为 20、电流频率 19 kHz。

本研究采用磁热耦合场的间接分析法,需要分步计算,在磁场分析后将其写入热物理环境再进行温度

场的分析<sup>[8]</sup>。这涉及到单元转换,当然转换前需清除磁场分析的边界条件。模具中的磁分析单元转换成 PLANE55 的热单元,热辐射单元改成用于辐射的空间节点,即将单元类型定义为 0<sup>[9-10]</sup>。

最后,笔者通过 ANSYS 进行反复循环耦合计算,从而实现电磁-热分析耦合的更精确的计算。

## 2 仿真结果及实验结果分析

本研究仿真得到的模具温度分布图如图4所示。仿真结果显示,当食品罐体模具被持续加热 3 min 时,模具的表面温度为  $104.8 \text{ }^\circ\text{C}$ ,中心温度为  $101.3 \text{ }^\circ\text{C}$ ,两者间的温度差  $3.5 \text{ }^\circ\text{C}$ 。即模具的圆柱表层温度高,靠近芯部的温度低,且靠近模具芯部的温度梯度小,使得模具上的各点温度分布较均匀。

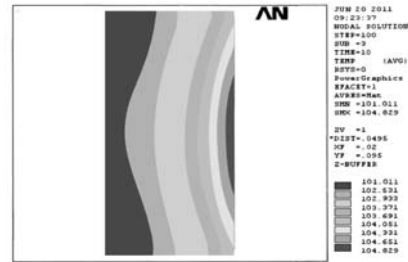


图4 加热 3 min 后模具的温度分布

由热胀冷缩特性知:

$$\Delta h = \alpha h \Delta T$$

式中: $\alpha$ —模具线膨胀系数, $h$ —模具常温下的高度, $\Delta T$ —模具受热前后温度变化值, $\Delta h$ —模具受热后高度的变化值。

由以上公式可知,模具的高度会随温度的变化而发生相应的线性变化,而且由以上结论知模具在径向温度分布较均匀,故模具上表面以中心为圆心的任意一个圆上面的任意两点的高度变化差值是很微小的。

ANSYS 仿真结果和实验结果如图5所示。图中的曲线1和2分别是靠近模具外壁的温度(影响食品罐体上盖质量的关键区域的温度—因食品罐体上盖刻痕位置靠近盖体外边缘)随时间变化的仿真结果和实验结果。两者的温度变化曲线基本重合。在 100 s 前为感

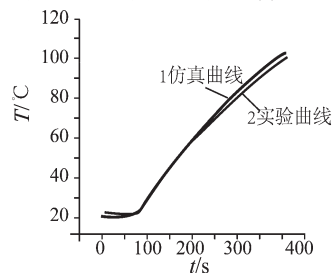


图5 仿真及实验结果

(下转第 622 页)

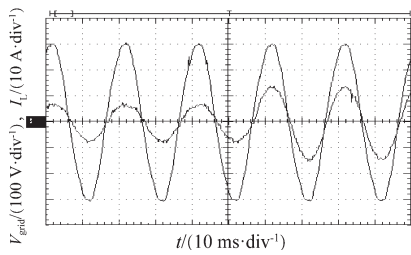


图6 1 kW跳到2 kW时波形图

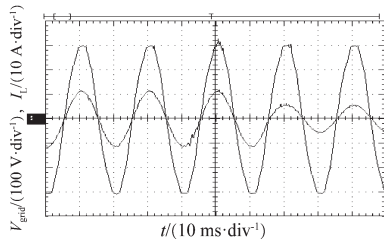


图7 2 kW跳到1 kW时波形图

## 4 结束语

本研究给出了光伏发电系统用并网逆变器后级逆变部分的双闭环控制系统设计方法与详细设计过程,提出了基于数字控制的并网电流内环的分段PI+准谐振控制策略。

理论研究与实验结果表明,该控制策略实现简单,利于系统稳定,有良好的动、静态性能,能准确跟踪指令信号、减小并网电流THD、有效抑制电网干扰,是一种非常实用的解决方案。

(上接第602页)

应加热响应时间,模具温度基本不变,而后模具温度迅速线性上升,即食品罐体模具高度随温度发生了线性变化,故通过自动控制食品罐体模具温度来实现食品罐体刻痕深度的实时控制是可行的。

## 3 结束语

本研究得到的仿真和实验结果表明,采用感应加热技术加热模具,模具受热快,径向温差小,同一圆周方向的轴向温度基本一致,最重要的是,模具在受热过程中,温度可视为线性变化,这些特点利于自动控制温度,能使控温达到较高的精确性,即对提高食品罐体产品的质量具有重大的意义。

### 参考文献(References):

- [1] SCOTT S L L, D G. Race of induction heating in lean manufacturing[J]. *Heating Treating progress*, 2006(6):31-36.
- [2] Fish M. Simulation of induction heating in manufacturing [J]. *Licentitate Thesis*, 2008(42): 271-335.
- [3] 王永国,尹永国. 感应加热温压系统的研究[D]. 合肥:合肥工业大学机械电子工程系,2008.
- [4] WU N X, ZHU J G. The research and analysis about extrusion production of the deairing pug mill variable tempere-

### 参考文献(References):

- [1] JUNG S M, BAE Y S, CHOI S, et al. A low cost utility interactive converter for residential fuel cell generation[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2007, 22(6): 2293-2298.
- [2] 王赞,肖岚,姚志全,等. 并网独立双模式控制高性能逆变器设计与实现[J]. *中国电机工程学报*, 2007, 27(1): 54-59.
- [3] 吴浩伟,段善旭,徐正喜. 一种新颖的电压控制型逆变器并网控制方案[J]. *中国电机工程学报*, 2008, 28(33): 19-24.
- [4] 金圆圆. 基于准PR控制的并网逆变器的研究[D]. 杭州:浙江大学电气工程学院,2008.
- [5] 孟元东. 太阳能用单相正弦波逆变器的研究[D]. 天津:天津大学环境学院,2007.
- [6] SHEN Ke, WANG Jian-ze, GAO Zhi-qiang, et al. Dynamic voltage restore based on proportional-resonant control[C]// *Asia Pacific Power and Energy Engineering Conference, IEEE Power & Energy Society*, 2010. Chengdu: [s.n.], 2010: 1-4.
- [7] 杭丽君,李宾,黄龙,等. 一种可再生能源并网逆变器的多谐振PR电流控制技术[J]. *中国电机工程学报*, 2012, 32(12): 51-58.
- [8] 徐德鸿. 电力电子系统建模及控制[M]. 北京:机械工业出版社,2007.
- [9] 张海钰,王正仕,陈辉明. PR控制在抑制逆变器输出变压器直流偏磁中的作用[J]. *机电工程*, 2011, 28(8): 986-990.
- [10] 席爱民. 计算机控制系统[M]. 北京:高等教育出版社,2004.

[编辑:李辉]

ture field based on ANSYS[J]. *Information Engineering*, 2010(3):57-61.

- [5] CHEN D X. *Machinery Handbook* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008.
- [6] ZHANG G X, TAO Y, WANG Y K. Reearch of dynamic forecasting model and ANSYS analysis of temperature field in slab[J]. *Hot Working Technology*, 2009, 38(15): 141-143.
- [7] ACERO J, NAVARRO D, BARRAGA L A. FPGA-based power mesuring for induction heating appliance using sigma-delta A/D conversion [J]. *Industrial Electronics*, 2007, 38(4): 1843-1852.
- [8] STAUFFER P R, CETAS T C, JONES R C. Magnetic induction heating of ferromagnetic implants for induction localized hyperthermia in deepseated tumors[J]. *Biomedical Engineering*, 1984, 53(1): 235-251.
- [9] HANSSON S, FISK M. Simulation and measurements of combined induction heating and extrusion processes[J]. *Finite Elements in Anlysis and Design*, 2010, 46(10): 906-915.
- [10] SHI J C, WEI M Y. Numerical simulation of temperature field in barrel of injection molding machine during induction heating process based on ANSYS software [J]. *Advance Materials Research*, 2009, 87(16): 16-21.

[编辑:李辉]